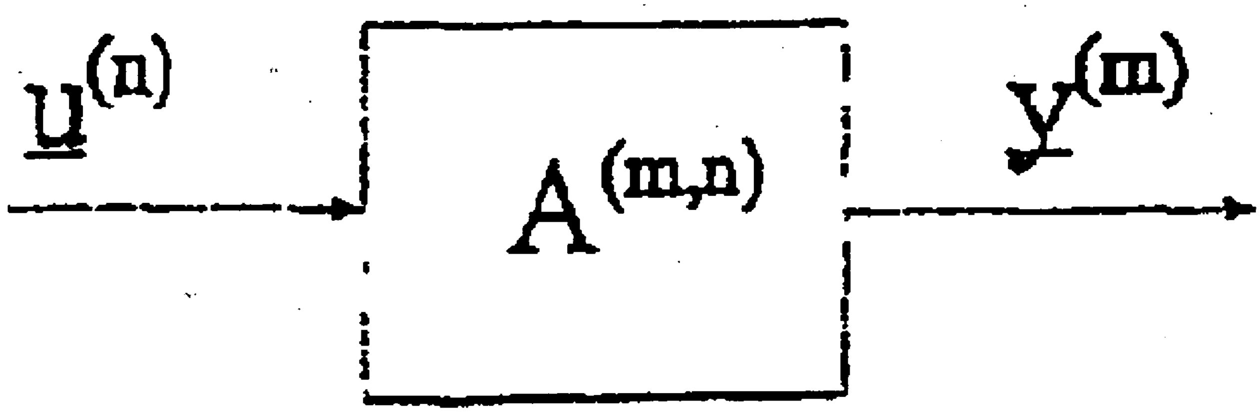
AN: PAT 2001-571807
TI: Controlling or regulating a unit involves deriving control vector with number of equations depending on input, control vector dimensions, weighting factors formed with control matrix
PN: **DE10040620**-A1
PD: 30.08.2001
AB: NOVELTY - The method involves applying a control vector to the unit depending on an initial parameter vector. The vector dimensions exceed one. The initial vector is the matrix product of the control vector and a control matrix that is the partial derivative of initial parameters with respect to input parameters. The control vector is derived with a number of equations depending on the dimensions and weighting factors formed with the control matrix. DETAILED DESCRIPTION - The method involves applying a control vector to the controlled unit depending on an initial parameter vector, whereby the vector dimensions are greater than one and the initial vector is the matrix product of the control vector and a control matrix resulting from the partial derivative of the initial parameters with respect to the input parameters. The problem is redundant if the initial vector dimension exceeds that of the input vector. The control vector is determined using a number of equations depending on the dimensions and weighting factors formed using the control matrix.; USE - For controlling or regulating a controlled unit. ADVANTAGE - Enables the redundancy in determining control parameters resulting from an excess of initial parameters to be used so that no parameter is excluded from the outset and simultaneously enables the practical solution of control and regulation problems with acceptable computing costs. DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows a control equation.
PA: (MARY/) MARYNIAK A;
IN: MARYNIAK A;
FA: **DE10040620**-A1 30.08.2001;
CO: DE;
IC: G05B-009/02; G05B-017/02;
MC: T06-A03; T06-A07B;
DC: T06;
FN: 2001571807.gif
PR: DE1039742 21.08.1999;
FP: 30.08.2001
UP: 07.11.2001



This Page Blank (uspto)

(19) BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT

(12) Offenlegungsschrift

(10) DE 100 40 620 A 1

(51) Int. Cl.[7]:
G 05 B 17/02
G 05 B 9/02

(21) Aktenzeichen: 100 40 620.3
(22) Anmeldetag: 16. 8. 2000
(43) Offenlegungstag: 30. 8. 2001

DE 100 40 620 A 1

(66) Innere Priorität:
199 39 742. 2 21. 08. 1999

(71) Anmelder:
Maryniak, André, 85579 Neubiberg, DE

(74) Vertreter:
Meissner, Bolte & Partner, 90402 Nürnberg

(72) Erfinder:
gleich Anmelder

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Verfahren zur Steuerung oder Regelung einer zu steuernden Einheit

(57) Es wird ein Verfahren zur Steuerung oder Regelung einer zu steuernden Einheit vorgeschlagen, wobei in einem überbestimmten System keine Vorauswahl von Meßgrößen getroffen wird, sondern alle Meßgrößen mit einer im Verfahren ermittelten Gewichtung zur Ermittlung eines Steuervektors u Berücksichtigung finden.

DE 100 40 620 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Steuerung oder Regelung einer zu steuernden Einheit, wobei die zu steuernde Einheit in Abhängigkeit eines aus einem Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ zu ermittelnden Steuergrößenvektor $\underline{u}$ beaufschlagt wird,
wobei der Steuergrößenvektor $\underline{u}$ die Dimension n und der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ die Dimension m aufweist und m und n jeweils größer 1 sind,
wobei der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ implizit über die Matrixgleichung:

$$\underline{y} = A \cdot \underline{u}$$

definiert ist, in der $\underline{y}$ den Ausgangsgrößenvektor und A eine Steuermatrix bezeichnet, die sich aus den partiellen Ableitungen der Ausgangsgrößen nach den Eingangsgrößen, die entweder bekannt oder beispielsweise durch Tastsignale ermittelbar sind, ergibt und
wobei das Steuer- oder Regelungsproblem aufgrund m größer n überbestimmt ist. Genaugenommen ist die Matrixgleichung $\underline{y} = A \cdot \underline{u}$ nur eine Approximation (Modell) an die eigentliche Regelstrecke $\underline{y} = f \cdot (\underline{u})$, wobei f eine u. U. unbekannte Funktion ist. Dieses Modell der Matrixgleichung $\underline{y} = A \cdot \underline{u}$ wird im folgenden vorausgesetzt.

Bei Steuerungen oder Regelungen besteht häufig das Problem, daß mehr Ausgangsgrößen als Resultat von Messungen, vorgegebenen Zuständen oder Informationen vorliegen als tatsächlich Freiheitsgrade in der Steuerung oder Regelung vorhanden sind. Es müssen dann Meßgrößen, Zustände oder Informationen beiseite gelassen werden, wobei die Auswahl, welche Ausgangsgrößen nicht zur Anwendung kommen, sehr problematisch ist. Es sind auch analytische Methoden zur Lösung eines derartigen überbestimmten Systems bekannt, wobei diese äußerst aufwendig und daher im technischen Anwendungsbereich gerade in Echtzeitproblemen aufgrund der erforderlichen Rechenleistung nicht in Betracht kommen.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, die durch die Überzahl der Ausgangsgrößen vorhandene Redundanz zur Ermittlung der Steuergrößen dadurch auszunutzen, daß keine Meßgröße, etc., von vornherein ausgeschlossen wird. Gleichzeitig soll ein einfaches Verfahren vorgeschlagen werden, das mit vertretbaren Rechenaufwand derartige Steuer- und Regelungsprobleme in der praktischen Anwendung lösen kann.

Diese Aufgabe wird gelöst mit einem Verfahren nach den Merkmalen des Anspruches 1 oder 9.

In einer Verallgemeinerung, die auch Lösungen für den Fall eines unterbestimmten Steuer- oder Regelungsproblems bietet, wird der Steuergrößenvektor unter Zuhilfenahme einer generalisierten pseudo-inversen Matrix ermittelt, gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 12.

Ein Kerngedanke der vorliegenden Erfindung besteht darin, das über- oder unterbestimmte System in

$$k = \frac{\max(m,n)!}{\min(m,n)! \cdot abs(m-n)!}$$

eindeutig lösbare Untergleichungssysteme aufzugliedern und den Beitrag des i-ten Gleichungssystems mit einem Wichtungsfaktor zu versehen, der sich aus der Steuermatrix A ermitteln läßt. In Patentanspruch 1 ist dieser Grundgedanke in Form eines Algorithmus für den Fall des überbestimmten Problems (m größer n) definiert.

In einer zweckmäßigen Ausgestaltung wird der Wichtungsfaktor w_i für den Beitrag des i-ten Gleichungssystems nicht aus der kompletten Steuermatrix A, sondern aus der dem i-ten Gleichungssystem zugeordneten Untermatrix A_i ermittelt, da gerade die Untermatrix A_i die das i-te Gleichungssystem bezeichnenden Informationen enthält.

In einer einfachen und zweckmäßigen Ausgestaltung läßt sich der Steuervektor $\underline{u}$ aus der Summe der mit den zugeordneten Wichtungsfaktoren w_i multiplizierten Untersteuervektoren u_i ermitteln,

$$\underline{u} = \frac{\Sigma (u_i \cdot w_i)}{\Sigma w_i}$$

Dabei müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden, daß die Werte im Nenner weder 0 noch ∞ erreichen.

Es sind prinzipiell verschiedene Verfahren zur Ermittlung eines Wichtungsfaktors aus der durch die Steuermatrix A vorgegebenen Information denkbar. In einer ersten alternativen konkreten Ausgestaltung des vorliegenden Verfahrens wird als Wichtungsfaktor w_i für das i-te Gleichungssystem der absolute Betrag der Determinante der i-ten Untermatrix A_i verwendet: $w_i = |\det(A_i)|$.

In einer anderen alternativen Ausgestaltung kann der Wichtungsfaktor w_i für das i-te Gleichungssystem aus einer Konditionszahl der i-ten Untermatrix, beispielsweise aus dem reziproken Wert der Zweier-Norm-Konditionszahl

$$w_i = \frac{1}{\kappa_i(A_i)}$$

ermittelt werden.

Ein besonderer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist darin zu sehen, daß die den Wichtungsfaktoren w_i zugrunde liegende Steuermatrix A und die daraus resultierenden Untermatrizen A_i zu verschiedenen Zeiten im Prozeß neu bestimmt werden können. Hierdurch kann noch im laufenden Prozeß die Genauigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten angepaßt werden.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung wird das Verfahren zur Bestimmung des jeweils gültigen Steuervektors $\underline{u}$ anhand eines aktualisierten Ausgangsgrößenvektors $\underline{y}$ iterativ durchgeführt. Durch die beim vorliegenden Verfahren vergleichsweise geringe Rechenleistung kann eine Vielzahl von iterativen Verfahrensschritten aneinander gereiht wer-

den.

Nach einem besonders vorteilhaften Aspekt der vorliegenden Erfindung sind die Wichtungsfaktoren w_i so definiert, daß eine Untermenge von Ausgangsgrößen $\underline{y}$ mit potentiell größeren systematischen Fehlern durch die vorzugsweise auch im laufenden Verfahren durchführbare Gewichtung im Vergleich zu einer Untermenge von Ausgangsgrößen y mit potentiell geringeren systematischen Fehlern weniger Berücksichtigung finden.

Ein besonderer Aspekt des vorliegenden Verfahrens, der auch unabhängig beansprucht wird, besteht darin, daß in einem überbestimmten System keine Vorauswahl von Meßgrößen getroffen werden muß, sondern vielmehr alle Meßgrößen mit einer im Verfahren ermittelten Gewichtung zur Ermittlung eines Steuervektors $\underline{u}$ Berücksichtigung finden. Während beim Stand der Technik Meßgrößen unberücksichtigt bleiben müssen, um das System auf ein lösbares Untergleichungssystem zurückzuführen, werden erfindungsgemäß alle Untergleichungssysteme mit einer speziellen, im allgemeinen jeweils von Null verschiedenen Gewichtung berücksichtigt.

In einem konkreten Anwendungsbereich kann das Verfahren zur Steuerung von Maschinen oder Robotern eingesetzt werden, die mindestens eine bewegliche Komponente wie einen Greifarm aufweisen und wobei der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ zumindest in zwei Dimensionen physikalische Entfernungen beinhaltet. Der Steuervektor $\underline{u}$ steuert dann einen Bewegungsablauf der beweglichen Komponente, insbesondere des Greifarms.

Das Verfahren erhöht die Leistungsfähigkeit, insbesondere Robustheit, Adaptivität, Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit von MIMO-(Multible-Input-Multible-Output)-Systemen, wobei der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ der Dimension m Zustände, Informationen, Meßergebnisse, etc., berücksichtigen kann und der Steuergrößenvektor $\underline{u}$ der Dimension n Zustände, Informationen, Aktionen, etc., definieren kann.

In einer generalisierten und gleichzeitig formalisierten Fassung, die nicht nur auf überbestimmte Systeme, sondern auch auf unterbestimmte Systeme anwendbar ist, wird eine generalisierte pseudo-inverse Matrix $A^{\blacklozenge}$ definiert, die sich als Summe eines Matrizenproduktes $(P_i\,A)^{-1}\,P_i$ im Falle des überbestimmten Systems (m größer n) jeweils multipliziert mit einem Wichtungsfaktor und $P_i\,(A\,P_i)^{-1}$ jeweils im Fall des unterbestimmten Systems m kleiner n ergibt, wobei der Wichtungsfaktor im Fall des überbestimmten Systems m größer n durch $[\mathrm{abs}(\det(P_i\,A))]^q$ und im Fall des unterbestimmten Systems m kleiner n durch $[\mathrm{abs}(\det(AP_i))]^q$ definiert ist. Durch diesen Formalismus, der die Moore-Penrosche Matrix oder "pseudoinverse" Matrix als Spezialfall für q gleich zwei enthält, lassen sich sowohl über- als auch unterbestimmte Systeme lösen.

Im konkreten, überbestimmten Fall lautet die entwickelte generalisierte pseudo-inverse Matrix:

$$A^{\blacklozenge}_{(m>n)} = \frac{\Sigma\,(P_i\,A)^{-1}\,P_i\,[\mathrm{abs}(\det(P_iA))]^q}{\Sigma\,[\mathrm{abs}\,(\det(AP_i)]^q}$$

Im Fall des unterbestimmten Systems m kleiner n lautet die entwickelte generalisierte pseudo-inverse Matrix:

$$A^{\blacklozenge}_{(m<n)} = \frac{\Sigma\,P_i\,(A\,P_i)^{-1}\,[\mathrm{abs}(\det(P_iA))]^q}{\Sigma\,[\mathrm{abs}\,(\det(AP_i)]^q}$$

Es hat sich überraschenderweise gezeigt, daß die Anwendung dieser generalisierten pseudo-inversen Matrix im Fall m = n – 1 mit $\underline{q} = 1$ die ∞-Norm von $\underline{r} = A \cdot \underline{u} - \underline{y}$ direkt minimiert, wobei die ∞-Norm wie folgt definiert ist: $\|x\|_\infty = \max\,\{|x_i|: i = 1, \ldots n\}$. Dies war bisher selbst mit aufwendigen Verfahren nicht möglich, ist aber in sehr vielen Problemstellungen besonders vorteilhaft und sinnvoll. Anstelle der ∞-Norm kann auch eine andere Norm Anwendung finden. Dabei sind die Hilfsmatrizen P_i im überbestimmten Fall (m > n) derart definiert, daß alle möglichen Kombinationen des Weglassens von (m – n) Reihen im Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ bzw. im unterbestimmten Fall (m < n) alle möglichen Kombinationen des Weglassens von (m – n) Zeilen beim Steuervektor $\underline{u}$ ermöglicht werden.

Die Erfindung wird nachstehend auch hinsichtlich weiterer Merkmale und Vorteile auch unter Würdigung von Spezialfällen und Ausführungsbeispielen noch weiter erläutert.

Das Verfahren ist anwendbar auf alle Systeme, wie sie in **Abb.** 1 veranschaulicht sind, welche wiederum auch Näherungen an beliebige nichtlineare Systeme darstellen können.

Dabei soll ein Steuervektor $\underline{u}$ so bestimmt werden, daß die Antwort des Systems den Ausgangsvektor $\underline{y}$ (mit höherer Dimension: m) ergibt. Mit A ist dabei die Steuermatrix beschrieben, deren Spalten- und Zeilenzahl aufgrund m größer n nicht übereinstimmt.

So ist exemplarisch in **Abb.** 2 der Fall der Regelung eines nichtlinearen Systems gezeigt, bei dem Redundanz im geschlossenen Regelkreis ausgenutzt wird. Das System ist in der Steuermatrix A linearisiert. Das erfindungsgemäße Verfahren der gewichteten Berücksichtigung aller Untergleichungssysteme wird hier auf eine Regelabweichung $\underline{e}$ anstelle des Ausgangsgrößenvektors $\underline{y}$ angewandt. Somit lassen sich ein Sollwertvektor und ein Meßgrößenvektor (in diesem Fall Regelgrößenvektor) höherer Dimension als der Stellgrößenvektor verarbeiten mit den weiter unten beschriebenen Vorteilen. Mit K wird hierbei eine übliche Verstärkungsmatrix bezeichnet. Mit den Möglichkeiten der digitalen Rechentechnik wird die Anwendung auf zeitdiskrete Systeme bzw. auf Systeme, in den Korrekturen in Echtzeit oder nahezu in Echtzeit notwendig sind, möglich. Zwei Beispiele von Anwendungen im zeitdiskreten Systemen sind in den **Abb.** 3 und 4 dargestellt, wobei in **Abb.** 3 die Ausnutzung von Redundanz in einem zeitdiskreten Regelkreis mit inkrementeller Stellgröße und in **Abb.** 4 die Ausnutzung von Redundanz in einem zeitdiskreten Regelkreis mit inkrementeller Regelgröße veranschaulicht ist. Der Fall der inkrementeller Regelgröße (**Abb.** 4) wird in der nachfolgenden Beschreibung noch eingehender behandelt.

Bei Systemen, die mehrere Ausgangsgrößen und mehrere Steuerungsgrößen besitzen, wird häufig ein Ergebnis als Lösung eines Gleichungssystems (bzw. einer Matrizengleichung) gesucht. Stimmt die Anzahl der. Unbekannten mit der Anzahl der (voneinander unabhängigen) Gleichungen überein, wird i.d.R. problemlos eine Lösung gefunden. In informationsverarbeitenden und technischen Systemen stehen jedoch häufig mehr Ausgangsgrößen (in vektorieller Notation: eine Ausgangsgröße höherer Dimensionalität) zur Verfügung bzw. könnte ohne größeren Mehraufwand zur Verfügung

gestellt werden, als minimal zur Lösung der Aufgabe erforderlich sind. Stehen somit mehr Gleichungen zur Verfügung als unbedingt nötig, kommt dies einer Redundanz gleich, die sich sinnvoll zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Systems nutzen ließe, wenn es dazu entsprechende Verfahren gäbe.

Als Verfahren zur Bestimmung des Ergebnisses solcher Gleichungssysteme ist, wie schon erwähnt, die, Bestimmung der gesuchten Größen über die Moore-Penrose'sche verallgemeinerte Inverse ("Pseudoinverse") bekannt. Ihre Implementation ist jedoch sehr aufwendig und ihre Komplexität so hoch, daß maschinelle Ressourcen überlastet und Echtzeitfähigkeit in der Regel nicht gegeben sind. Es existieren weitere Versuche der Bestimmungen von Ergebnissen aus solchen Systemen, die jedoch nicht an die Leistungsfähigkeit der Lösung über die Pseudoinverse heranreichen. Als Konsequenz werden die redundanten Größen häufig nicht verwendet und mögliche Vorteile somit nicht genutzt.

Sind von vornherein mehr Eingangsgrößen als notwendig vorhanden, soll aber nur die minimal notwendige Anzahl verwendet werden, zeigt sich ein weiterer Nachteil: Es müssen Eingangsgrößen weggelassen werden. Je nachdem, welche Eingangsgrößen weggelassen werden, kann dabei das Ergebnis sehr unterschiedlich sein. Will man auf diesem Weg arbeiten, muß man im voraus bestimmen, welche Eingangsgrößen sinnvollerweise weggelassen werden können, man muß ihre Eignung also a priori kennen. Dies kann jedoch aufwendig, wenn nicht gar unmöglich, sein. Darüber hinaus kann sich die Eignung insbesondere unter wechselnden Bedingungen, auch während des Betriebs, massiv ändern. Demzufolge ist das Ergebnis u. U. Glückssache.

Es sei nochmals erwähnt, daß als Eingangsgrößen in erster Linie Meßgrößen in Betracht kommen. Es können aber auch andere Größen wie Schätzgrößen, statische Randbedingungen, Nachrichten, statistische Informationen, etc., ganz oder teilweise als Eingangsgrößen in Betracht kommen.

Das Verfahren nach der Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß vorhandene oder erreichbare Redundanz nutzbar gemacht wird. Dies schließt ein, daß das Ergebnis ebenso gut oder besser als das ohne Nutzung von Redundanz erzielte ist, und daß die Realisierung vergleichsweise einfach ist. Das Verfahren läßt sich ohne übermäßig hohen Aufwand in der Nutzung von maschinellen Ressourcen (z. B. Rechenleistung) bzw., wo dies bedeutsam ist, in der Regel auch in Echtzeit durchführen.

Das Verfahren zeigt gute und zuverlässige Ergebnisse, auch wenn die Anordnung massiv gestört wird. Obwohl bei Anwendung des Verfahrens alle Eingangsgrößen berücksichtigt werden, wird das Gesamtergebnis praktisch nicht durch Ergebnisse aus weniger geeigneten Sätzen von Eingangsgrößen beeinträchtigt, was bei anderen Verfahren durchaus der Fall sein könnte.

Hauptvorteile sind:

- Es ist keine Auswahl von Messungen im voraus nötig.
- Beliebige Störungen in Aufbau und Anordnung des Systems werden toleriert.
- Eine selbständige Adaption des Systems an Änderungen wird gewährleistet.
- Ein Einsatz ist bei kalibrierungsfreien Robotern oder allgemein in Systemen möglich, über die kein exaktes Model bzw. exakte Kalibrierung existiert, wobei das Verfahren naturgemäß nicht auf derartige Anwendungen beschränkt ist.

Ausnutzung von Redundanz bietet eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit selbst gegenüber Systemen unter Nutzung der am besten geeigneten Eingangsgrößen. Sie äußert sich in:

- Geschwindigkeit sowie
- Zuverlässigkeit und Genauigkeit.

Die Ausnutzung von Redundanz durch das Verfahren belastet die rechnerischen Ressourcen nur geringfügig mehr gegenüber einem Betrieb unter Verzicht auf Ausnutzung der Redundanz.

Als ein Anwendungsbeispiel wird die Verbesserung des sichtbasierten Greifens eines Objekts durch einen kalibrierungsfreien Roboter nachfolgend erläutert. Das hier erläuterte Verfahren zur Steuerung eines Roboters nutzt die Redundanz der Meßdaten. Zuverlässigkeit und Anspassungsfähigkeit der Robotersteuerung werden so verbessert. Um sich das Problem vor Augen zu führen, kann man sich einen Aufbau von zwei identischen Kameras vorstellen, welche eine Szene beobachten. Die Kameras sind genau parallel zueinander aufgestellt, so daß die Elipolarlinie parallel zur X-Achse beider Bildkoordinatensysteme verläuft. In diesem Fall enthalten die beiden zu den Y-Koordinaten der Kameras gehörenden Gleichungen (bei Außerachtlassung von Rauschen) die gleiche Information. Das Weglassen einer dieser beiden Gleichungen würde keinen Verlust bedeuten. Jedoch wenn Meßrauschen vorhanden ist, stellt bereits die Mittelung beider Gleichungen eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Weglassen einer Kamerainformation dar.

Dagegen würde im vorigen Beispiel das Weglassen einer der beiden anderen Gleichungen alle Tiefeninformationen beseitigen und würde (bis auf das Rauschen) ein unterbestimmtes System ergeben, das nicht ohne weitere Zusatzbedingungen gelöst werden kann, da von drei Gleichungen zwei mit selben Informationsgehalt bei drei Unbekannten vorhanden wäre. Wenn Rauschen vorhanden ist, läßt sich meistens eine Lösung ermitteln, die aber praktisch wertlos ist.

Wenn die Kameraanordnung nicht exakt, sondern lediglich näherungsweise der vorbeschriebenen entspricht, so werden die X-Gleichungen eine relative Tiefeninformation enthalten und das Weglassen einer von ihnen führt zu einem System, das eine Lösung aufweist, bei dem jedoch schon leichte Veränderungen der Ausgangsdaten große Änderungen der Lösung bewirken. Die Lösung wird daher relativ verrauscht sein und keine gute Grundlage für eine Robotersteuerung bieten. Wenn die Kameraanordnung beliebig und nicht exakt bekannt ist, führt das Weglassen einer der vier Gleichungen zu Ergebnissen mit vorher nicht einschätzbarer Qualität.

Der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ besteht hier aus dem Distanzvektor $\underline{d}$ zwischen Greifer und zu greifendem Objekt in zwei Kamerabildern (**Abb.** 5). Da dieser zum Greifen des Objekts minimiert werden soll, ist der Sollgrößenvektor $\underline{x}$ der Nullvektor, und zusätzlich zur Darstellung in **Abb.** 4 wird die Regelabweichung (in diesem Fall $-\underline{d}$) über eine Totzone geführt. Die Verstärkungsmatrix K ist die Einheitsmatrix der Dimension (n, n).

Zum Greifen punktförmiger Objekte sind drei Freiheitsgrade des Manipulators erforderlich, deshalb werden die Gelenke Jt_1 bis Jt_3 aktiv angesteuert (**Abb.** 6). Da ein Steuerwortvektor an diesem Manipulator immer eine Relativbewegung zur vorherigen Lage verursacht, wird die Regelgröße inkrementiert. Mit der vorhandenen vierten Dimension in der Bildinformation ergibt sich also für die Regelung die Bestimmung des Steuerwortvektors $\underline{u}$ hier $\underline{c}$, aus

$$-\underline{d} = J \cdot \underline{c}, \quad (1)$$

mit

$$\underline{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{pmatrix}$$

$$J = \left[\frac{\partial \underline{d}}{\partial \underline{c}}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial c_1} & \frac{\partial d_1}{\partial c_2} & \frac{\partial d_1}{\partial c_3} \\ \frac{\partial d_2}{\partial c_1} & \frac{\partial d_2}{\partial c_2} & \frac{\partial d_2}{\partial c_3} \\ \frac{\partial d_3}{\partial c_1} & \frac{\partial d_3}{\partial c_2} & \frac{\partial d_3}{\partial c_3} \\ \frac{\partial d_4}{\partial c_1} & \frac{\partial d_4}{\partial c_2} & \frac{\partial d_4}{\partial c_3} \end{bmatrix}$$

$$\underline{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

wobei A hier als Jacobi-Matrix J auftritt.

Es läßt sich aus (1) ein System von jeweils exakt bestimmten Gleichungssystemen dadurch erreichen, daß jeweils $m - n$ Zeilen für die Ausgangsgrößen $\underline{d}$ außer Betracht gelassen werden. Dies kann auf k unterschiedlichen Weisen erfolgen, wobei jeweils eine exakte Lösung für $\underline{c}_i$ erzielt wird:

$$-\underline{d}_i = J_i \cdot c_i$$

$$k = \frac{m!}{n!\,(m-n)!}$$

Im Idealfall sollten alle diese Systeme die gleiche (richtige) Lösung ergeben. In der Praxis ist jede Gleichung beeinflußt vom jeweils zugeordneten Meßrauschen, so daß die einzelnen Lösungen sich voneinander unterscheiden. Einige der Untergleichungssysteme können so schlecht konditioniert sein, daß sie Lösungen ergeben, die vorrangig auf Meßrauschen beruhen.

Um den Vorteil aus der gesamtverfügbaren Information zu nutzen, wird der Steuervektor $\underline{c}$ ermittelt als gewichtetes Mittel aller Lösungen der reduzierten Untergleichungssysteme:

$$\underline{c} = \frac{\Sigma\, \underline{c}_i \cdot w_i}{\Sigma\, w_i}$$

Hierin sollten die Wichtungsfaktoren w_i die "Qualität" des zugeordneten Untergleichungssystems widerspiegeln. Da keinerlei weitere Annahmen getroffen werden, ist über das Gleichungssystem

$$-\underline{d}_i = J_i \cdot c_i$$

kein weiteres Wissen verfügbar. Daher können die Wichtungsfaktoren nur aus den Gleichungssystemen selbst erhalten werden. Als Indikator für die Qualität der jeweiligen Untergleichungssysteme kann die Konditionszahl κ Verwendung finden. Es ist ein numerisches Maß für die Kondition eines Problems, die sich hier aus J_i ermitteln läßt. Im vorliegenden Fall wurde die Zweier-Norm-Konditionszahl κ_2 verwendet. Als Alternative kann aber auch ein Wichtungsfaktor aus dem Absolutbetrag der Determinante

$$w_i = |\det(J_i)|$$

errechnet werden.

Da die Errechnung der Konditionszahl einen höheren Rechenaufwand als die Berechnung der Determinante erfordert, wird gerade für Echtzeitanwendungen die Verwendung eines Wichtungsfaktors basierend auf dem Absolutwert der Determinante bevorzugt.

Im Ergebnis werden in beiden Fällen alle Gleichungen und damit alle Ausgangsgrößen bzw. Meßgrößen der Berechnung des Steuervektors verwendet. Dies ist von Vorteil, da sogar eine sehr verrauschte oder redundante Meßgröße immer noch nützliche Information enthalten kann. Wenn jedoch ein Untergleichungssystem keinen vollen Rang erreicht, trägt es praktisch nicht zum Endergebnis bei. Daher werden Ergebnisse von "schlechten" Untergleichungssystemen im Endergebnis nur mit einer sehr geringen Gewichtung berücksichtigt.

Beide Verfahren zur Berechnung von w_i gestatten die Lösung von Problemen mit $n \geq 2$ im konkreten Fall von $m = 4$ und $n = 3$ existieren $k = 4$ Möglichkeit des Weglassens jeweils einer Zeile in $\underline{d}$ und J, es werden also bei jeder Steuerwortberechnung, deren Ausführung der Distanzvektor zum Verschwinden bringen sollte, vier Teilsysteme gebildet, deren Teillösung berechnet und abschließend durch das erfindungsgemäße Wichtungsverfahren miteinander zum auszugebenden Steuerwort bzw. Steuervektor verknüpft.

Mit zwei verschiedenen experimentellen Anordnungen wurden systematische Untersuchungen vorgenommen: Bei der ersten Anordnung waren beide Kameras in etwa gleicher Höhe mit ungefähr gleichem horizontalen Blickwinkel angeordnet. Bei der zweiten wurden sie zur Modellierung einer starken Störung unbekannter Art in der Höhe gegeneinander verschoben und die Blickwinkel verändert. Dies wird anhand der **Abb.** 6, in der eine schematische Darstellung des Roboters veranschaulicht ist, sowie in der **Abb.** 7, die einen Blick auf den Roboter und das Objekt zeigt, veranschaulicht. Das in **Abb.** 7 eingeblendete Koordinatensystem wird hier nicht benutzt, sondern dient lediglich zur Veranschaulichung des vorliegenden Steuerungs- bzw. Regelungsproblems.

Hierbei muß keinerlei theoretisches Modell und auf keinen Fall quantitatives Wissen über die Mechanik, die Kinematik, die Sensoren oder die Steuercharakteristik des Roboters vorliegen.

In typischen Situationen wurden $\underline{d}$ und J in beiden Anordnungen gemessen. Anschließend wurden Störungen in Form von Meßrauschen simuliert und die Reaktionen der Teilsysteme, in denen eine Information weggelassen worden war, sowie des Gesamtsystems unter Ausnutzung der Redundanz in Form der erfindungsgemäßen Wichtungsverfahren in ihrer Auswirkung auf das zu berechnende Steuerkommando untersucht. Es zeigt sich, daß Teilsysteme, in denen wichtige Informationen weggelassen worden waren, in beiden Fällen schlechte bis sehr schlechte Ergebnisse, Teilsysteme, in denen weniger wichtige Informationen weggelassen worden waren, gute Ergebnisse, und das Gesamtsystems unter Ausnutzung des erfindungsgemäßen Wichtungsverfahrens mindestens so gute, z. T. bessere Ergebnisse lieferten als letztgenannte. **Abb.** 8 und die nachstehende Tabelle 1 belegen dies.

Tabelle 1

Die Standardabweichungen der Greiferpositionen in den Simulationen

	Standardabweichung [mm]			
	X	*Y*	*Z*	gesamt
erfindungsgemäßes Wichtungsverfahren	1,68	1,97	2,08	3,32
d_1 unberücksichtigt	1,62	27,53	13,76	30,82
d_2 unberücksichtigt	1,44	2,11	2,92	3,88
d_3 unberücksichtigt	19,70	85,51	12,05	88,57
d_4 unberücksichtigt	1,43	1,81	2,90	3,71

Die wichtigsten Ergebnisse aus den durchgeführten Experimenten werden kompakt in Tabelle 2 dargestellt.

Die wichtigsten Werte sind die in der zweiten Spalte angegeben. Sie kennzeichnen die Anzahl der Stellschritte, die notwendig sind, um eine geeignete Zwischenposition oberhalb des Objekts zu erreichen, von der aus in offener Steuerung zugegriffen werden kann. Ebenfalls wichtig ist die Standardabweichung dieser Werte in der dritten Spalte. Beide Spalten sind immer dann sinnvoll für die Beurteilung, wenn in den letzten beiden Spalten annehmbare Werte erzielt wurden. Ist dies nicht der Fall, so konnte die Greifaufgabe zu selten erfüllt werden, um das Kriterium der Anzahl der Stellschritte sinnvoll heranzuziehen. Die letzten beiden Spalten unterscheiden sich dadurch, daß in der letzten nur die Annäherung an die Zwischenposition und in der vorletzten der gesamte Greifvorgang einschließlich des Zugreifens ohne Rückkopplung betrachtet werden. In diesen Spalten sollte nur beurteilt werden, ob gute Werte erreicht wurden (10,0 entspricht 100%), und nicht, wie gut sie tatsächlich waren, da es aufgrund anderer Effekte, die nicht Gegenstand dieser Betrachtung sind, z. T. zu erheblichen Meßfehlern kam, wodurch der Greifvorgang in bestimmten Fällen komplett ausfiel.

Es zeigten sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 2

Ergebnisse aus Experimenten unter Weglassen von Informationen verglichen zur Nutzung von Redundanz durch Determinanten-gewichtete Mittelwertbildung bei unterschiedlichen Anordnungen. Der Arbeitsbereich war in Quadrate einer Kantenlänge von 3,5 cm eingeteilt worden, innerhalb derer das zu greifende Objekt jeweils 10mal zufällig positio-

niert wurde. Die so für die jeweiligen Quadrate ermittelten Werte wurden zur Berechnung der Werte in den Tabellenfeldern verwendet. Felder ohne verfügbare Werte sind durch k. W gekennzeichnet.

	Mittelwert der Anzahl notwendiger Stellschritte	Standardabweichung der Anzahl von Stellschritten	Mittelwert erfolgreicher Greifvorgänge	Mittelwert erfolgreicher Annäherungen
erste Serie: Kameras auf unterschiedlicher Höhe				
erfindungsgemäßes Wichtungsverfahren	2,01	0,41	9,73	9,73
d_1 unberücksichtigt	3,42	1,27	4,41	8,14
d_2 unberücksichtigt	2,15	0,50	9,73	9,82
d_3 unberücksichtigt	3,4	1,07	4,41	7,27
d_4 unberücksichtigt	2,13	0,46	9,27	9,86
zweite Serie: Kameras auf unterschiedlicher Höhe				
erfindungsgemäßes Wichtungsverfahren	1,08	0,14	8,91	8,91
d_1 unberücksichtigt	k.W.	k.W.	0	0
d_2 unberücksichtigt	1,23	0,16	9,45	9,91
d_3 unberücksichtigt	1,35	0,04	3,1	4,2
d_4 unberücksichtigt	1,93	0,27	6,5	10,0

- Das Verfahren zeigt gute und zuverlässige Ergebnisse, auch wenn die Anordnung massiv gestört wird.
- Beim Weglassen von Meßgrößen kann das Ergebnis sehr unterschiedlich sein. Wollte man auf diesem Wege arbeiten, müßte man im voraus bestimmen, welche Größen sinnvollerweise weggelassen werden können, man muß ihre Eignung also a priori kennen. Dies kann jedoch aufwendig, wenn nicht gar unmöglich sein, darüber hinaus kann sich die Eignung insbesondere unter wechselnden Bedingungen, auch während des Betriebes, massiv ändern. Demzufolge ist das Ergebnis u. U. Glückssache.
- Obwohl beim erfindungsgemäßen Wichtungsverfahren alle individuellen Lösungen berücksichtigt werden, wird das Gesamtergebnis nicht durch Ergebnisse weniger geeigneter Teilsysteme beeinträchtigt, was bei anderen Verfahren durchaus der Fall sein könnte. Hauptvorteile sind:
  - Es ist keine Auswahl von Messungen im voraus nötig.
  - Beliebige Störungen in Aufbau und Anordnung des Systems werden toleriert.
  - Da die Gewichte jedesmal neu berechnet werden, wenn sich die Jacobi-Matrix ändert, wird eine selbständige Adaption des Systems an Änderungen gewährleistet.
- Ausnutzung von Redundanz bietet eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit:
  - In der ersten Anordnung sichtbar an der geringeren Anzahl an Stellschritten, auch wenn die Verbesserung hier noch recht gering ist.
  - Sehr deutlich ist diese Verbesserung hingegen mit 1,08 Stellschritten gegenüber 1,23 des besten (und eigentlich einzig tauglichen) Teilsystems in der zweiten Anordnung.
- Die erhöhte Leistungsfähigkeit durch das erfindungsgemäße Wichtungsverfahren äußert sich u. a. durch:
  - Geschwindigkeit, da weniger Stellschritte erforderlich sind, und
  - Zuverlässigkeit, da weniger Stellschritte eine höhere Genauigkeit bei der Ausführung der einzelnen Stellschritte indizieren.
- Die Ausnutzung von Redundanz durch erfindungsgemäßes Wichtungsverfahren ermöglichte weiterhin Echtzeitbetrieb.

Nach einem weiteren Gedanken der vorliegenden Erfindung wird eine generalisierte pseudo-inverse Matrix eingeführt, die mit leichten Abänderungen eine gewichtete Einbeziehung aller Untergleichungssysteme sowohl im überbestimmten Fall $m > n$ als auch im unterbestimmten Fall $m < n$ schafft. Hierzu wird ein für das i-te Untergleichungssystem repräsentatives Matrizenprodukt mit einem für das i-te Untergleichungssystem repräsentativen Wichtungsfaktor multipliziert und anschließend über alle k-Gleichungssysteme summiert, wobei die so erhaltene Matrix noch über die Wichtungsfaktoren aller k-Gleichungen skaliert wird.

Das Matrixprodukt für den überbestimmten Fall $m > n$ lautet für das i-te Gleichungssystem $(P_i A)^{-1} P_i$, wobei P_i Hilfsmatrizen sind derart, daß alle möglichen Kombinationen des Weglassens von $(m - n)$ Reihen im Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ ermöglicht werden und eine vorangestellte Multiplikation mit der Steuermatrix A durchgeführt wird. Für den Beispielsfall $m = 4$ und $m = 3$ lauten die Hilfsmatrizen P(i):

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Im unterbestimmten Fall $m < n$ ist das Matrizenprodukt durch $P_i(AP_i)^{-1}$ definiert, wobei die Hilfsmatrizen P_i derart aufgebaut sind, daß alle möglichen Kombinationen des Weglassens von $(m - n)$ Zeilen beim Steuervektor $\underline{u}$ erreicht werden und eine nachgeordnete Multiplikation mit P durchgeführt wird.

Es ist zu beachten, daß die generalisierte pseudo-inverse Matrix für den Unterfall $q = 2$ der Moore-Penrose'schen Matrix entspricht, die bereits bekannt ist. Erfindungsgemäß werden daher die vorgenannten generalisierten pseudo-inversen Matrizen für $q \neq 2$, $q \notin C$ beansprucht. Es ist noch anzumerken, daß die bereits bekannte Moore-Penrose'sche Matrix alle vier Penrose-Bedingungen erfüllt, nämlich

(P1): $AA^{-1}A = A$; (P3): $AA^{-1} = (AA')^*$
(P2): $A^{-1}AA^{-1} = A$; (P4): $A^{-1}A = (A^{-1}A)^*$
(A^* bedeutet die hermitische Matrix zu A)

wohingegen die generalisierte pseudo-inverse Matrix nach der Erfindung $A^\blacklozenge$ im überbestimmten Fall $m > n$ nur die Gleichungen P_1, P_2 und P_4, nicht jedoch die Gleichung P_3 erfüllt. $A^\blacklozenge$ kann daher auch als $\{1, 2, 4\}$ Inverse zu A bezeichnet werden.

Im unterbestimmten Fall m kleiner n erfüllt die pseudo-inverse Matrix $A^\blacklozenge$ die Penrose-Bedingungen P_1, P_2, P_3, nicht jedoch $P_4 \cdot A^\blacklozenge$ kann daher als $\{1, 2, 3\}$ inverse Matrix zu A bezeichnet werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist in seiner Anwendung nicht auf das Feld der Steuerung oder Regelung beschränkt. Vielmehr kann das erfindungsgemäße Verfahren auch für allgemeine Anwendung, wie beispielseise für die Datengewinnung eingesetzt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung oder Regelung einer zu steuernden Einheit, wobei die zu steuernde Einheit in Abhängigkeit eines aus einem Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ zu ermittelnden Steuergrößenvektor $\underline{u}$ beaufschlagt wird, wobei der Steuergrößenvektor $\underline{u}$ die Dimension $\overline{n}$ und der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ die Dimension m aufweist und m und n jeweils größer 1 sind,
wobei der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ implizit über die Matrixgleichung:

$$\underline{y} = A \cdot \underline{u}$$

definiert ist, in der $\underline{y}$ den Ausgangsgrößenvektor und A eine Steuermatrix bezeichnet, die sich aus den partiellen Ableitungen der Ausgangsgrößen nach den Eingangsgrößen, die entweder bekannt oder beispielsweise durch Tastsignale ermittelbar sind, ergibt und
wobei das Steuer- oder Regelungsproblem aufgrund m größer n überbestimmt ist,
dadurch gekennzeichnet,
daß

$$k = \frac{\max(m, n)!}{\min(m, n)!\ \mathrm{abs}(m - n)!}$$

Untergleichungssysteme gebildet werden, und zur Ermittlung des Steuervektors $\underline{u}$ alle k Gleichungssysteme mit einem anhand der Steuermatrix A gebildeten Wichtungsfaktor w_i, $i \in 1, \ldots, k$ beitragen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Wichtungsfaktor w_i für das i-te Gleichungssystem aus der zugeordneten Untermatrix A_i ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Steuervektor $\underline{u}$ aus der Summe der mit den zugeordneten Wichtungsfaktoren w_i multiplizierten Untersteuervektoren $\underline{u}_i$ ermittelt wird:

$$\underline{u} = \frac{\Sigma\,(u_i \cdot w_i)}{\Sigma\, w_i}$$

wobei zusätzlich geeignete Absicherungen gegen die Werte 0 im Nenner und ∞ zu treffen sind.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 dadurch gekennzeichnet, daß der Wichtungsfaktor w_i für das i-te Gleichungssystem anhand der Determinante der i-ten Untermatrix A_i ermittelt wird:

$$w_i\ |\det(A_i)|$$

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Wichtungsfaktor w_i für das i-te Gleichungssystem aus einer Konditionszahl der i-ten Untermatrix, beispielsweise aus dem reziproken Wert der Zweier-Norm-Konditionszahl ermittelt wird:

$$\underline{u} = \frac{1}{\kappa_2(A_i)}$$

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die den Wichtungsfaktoren w_i zugrundeliegende Steuermatrix A und die daraus resultierenden Untermatrizen A_i zu verschiedenen Zeiten im Prozeß neu bestimmt werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren unter Berücksichtigung eines aktualisierten Ausgangsgrößenvektors $\underline{y}$ zur Ermittlung des jeweils gültigen Steuervektors $\underline{u}$ iteriert wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Untermenge von Ausgangsgrößen $\underline{y}$ mit potentiell größeren systematischen Fehlern durch die im laufenden Verfahren mit vergleichsweise geringen Rechenaufwand durchführbare Gewichtung im Vergleich zu einer Untermenge von Ausgangsgrößen $\underline{y}$ mit potentiell geringeren systematischen Fehlern weniger Berücksichtigung finden.
9. Verfahren zur Steuerung oder Regelung einer zu steuernden Einheit, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß in einem überbestimmten System keine Vorauswahl von Ausgangs- bzw. Meßgrößen getroffen wird, sondern alle Ausgangs- bzw. Meßgrößen mit einer im Verfahren ermittelten Gewichtung zur Ermittlung eines Steuervektors $\underline{u}$ Berücksichtigung finden.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren zur Steuerung von Maschinen oder Robotern mit einer beweglichen Komponente wie einem Greifarm eingesetzt wird, wobei der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ zumindest in zwei Dimensionen Entfernungen beinhaltet und der Steuervektor $\underline{u}$ einen Bewegungsablauf der beweglichen Komponente, insbesondere des Greifarms steuert.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß Zustände, Informationen, Aktionen, etc., durch den Steuervektor $\underline{u}$ der Dimension n und Zustände, Informationen, Messungen, etc., als Bestandteile des Ausgangsgrößenvektors $\underline{y}$ der Dimension m definiert sind.
12. Verfahren zur Steuerung oder Regelung einer zu steuernden Einheit, wobei die zu steuernde Einheit in Abhängigkeit eines aus einem Ausgangsgrößenvektors $\underline{y}$ zur ermittelnden Steuergrößenvektors u beaufschlagt wird,
wobei der Steuergrößenvektor $\underline{u}$ die Dimension n und der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ die Dimension m aufweist und zumindest m oder n größer 1 sind,
wobei der Ausgangsgrößenvektor $\underline{y}$ implizit über die Matrixgleichung:

$$\underline{y} = A \cdot \underline{u}$$

definiert ist, in der $\underline{y}$ den Ausgangsgrößenvektor und A eine Steuermatrix bezeichnet, die sich aus den partiellen Ableitungen der Ausgangsgrößen nach den Eingangsgrößen, die entweder bekannt oder beispielsweise durch Tastsignale ermittelbar sind, ergibt und
wobei das Steuer- oder Regelungsproblem aufgrund m größer n überbestimmt ist oder aufgrund m kleiner n unterbestimmt ist,
dadurch gekennzeichnet,
daß

$$k = \frac{\max(m,n)!}{\min(m,n)!\ \operatorname{abs}(m-n)!}$$

Untergleichungssysteme gebildet werden und zur Lösung des Steuer- oder Regelungsproblems eine generalisierte pseudo-inverse Matrix zur Anwendung kommt, in der Hilfsmatrizen P_i eingeführt sind, derart, daß für das i-te Gleichungssystem ein Summant bestehend aus einem Matrixprodukt $(P_i A)^{-1} P_i$ im Falle m größer n und $P_i (AP_i)^{-1}$ im Falle m kleiner n multipliziert mit einem Wichtungsfaktor $[\operatorname{abs}(\det(P_i A))]^q$ im Falle m größer n und $[\operatorname{abs}(\det(AP_i))]^q$ im Fall m kleiner n zur Anwendung kommt.
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß im überbestimmten Fall m größer n die generalisierte pseudo-inverse Matrix lautet:

$$A^{\blacklozenge}_{(m>n)} = \frac{\Sigma\,(P_i A)^{-1} P_i\,[\operatorname{abs}(\det(P_i A))]^q}{\Sigma\,[\operatorname{abs}(\det(AP_i)]^q}$$

14. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß im unterbestimmten Fall m kleiner n die generalisierte pseudo-inverse Matrix lautet:

$$A^{\blacklozenge}_{(m<n)} = \frac{\Sigma\,P_i\,(A P_i)^{-1}\,[\operatorname{abs}(\det(P_i A))]^q}{\Sigma\,[\operatorname{abs}(\det(AP_i)]^q}$$

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß im Fall m = n − 1 mit der Wahl $\underline{q} = 1$ eine Lösung für den Steuervektor $\underline{u}$, welche die ∞-Norm von $\underline{r} = A \cdot \underline{u} - \underline{y}$ direkt minimiert, ermittelbar ist.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Nummer: DE 100 40 620 A1
Int. Cl.[7]: G 05 B 17/02
Offenlegungstag: 30. August 2001

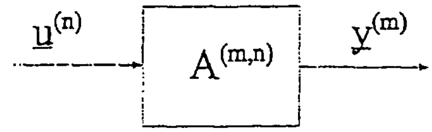


Abbildung 1

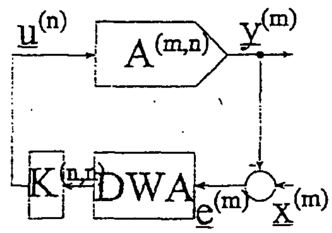


Abbildung 2

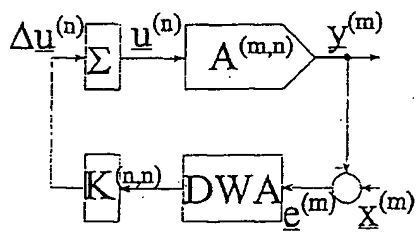


Abbildung 3

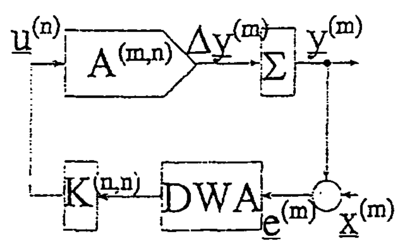


Abbildung 4

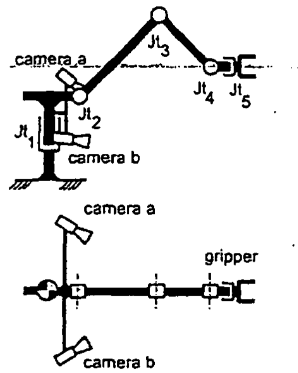


Abbildung 6

Abbildung 7

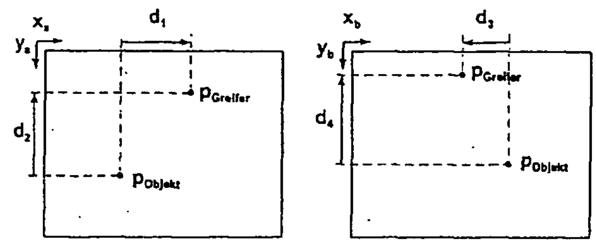


Abbildung 5

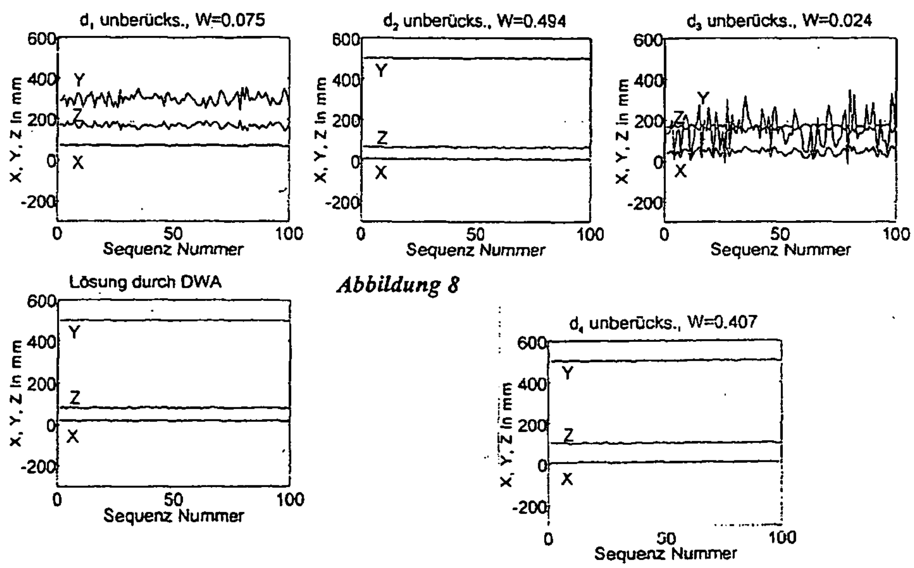


Abbildung 8